

САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

Физический факультет

Кафедра радиопизики

Чеков Андрей Алексеевич

**Частотная зависимость поглощения КВ радиоволн обусловленного
высыпаниями энергичных протонов**

БАКАЛАВРСКАЯ РАБОТА

Научный руководитель

ст. научный сотрудник, PhD _____ Заалов Н. Ю.

Рецензент

к.ф.-м.н. _____ Миронова И. А.

Санкт-Петербург

2017

Оглавление

Введение	3
1. Подход к моделированию	5
1.1 Модель поглощения	7
1.2 Модификация модели поглощения.....	9
1.3 Оптимизация коэффициентов <i>md</i> и <i>mn</i>	11
2. Экспериментальные ионограммы	12
3. Проверка метода. Результат моделированных ионограмм.....	16
3.1 Частотная зависимость поглощения	16
3.3 Оптимизация коэффициентов <i>md</i> и <i>mn</i>	23
Вывод	29
Литература.....	30

Введение

Ионосфера – это верхний слой атмосферы, ионизированный под воздействием ультрафиолетового излучения Солнца, в результате чего образуются положительно заряженные ионы и свободные электроны. Также ионизация происходит за счет рентгеновского излучения солнечной короной и корпускулярными потоками Солнца.

Ионосфера расположена на высотах примерно 50-1300 км. Причем концентрация свободных электронов меняется по высоте. В зависимости от концентрации свободных электронов и соответственно положительно заряженных ионов ионосферу условно делят на слои – D, E, F1 и F2. Наименьшая концентрация в слое D, а наибольшая в F2. Состояние ионосферы непрерывно меняется, оно зависит от солнечной активности, времени года и суток.

В слое D, который расположен на высотах 50-90 км, концентрация заряженных частиц составляет $10^2 - 10^3 \text{ см}^{-3}$. Этот слой имеет наименьшую ионизацию, причем в ночное время ионизация частиц иногда исчезает. Слой E находится на высотах 90-120 км. В этом слое уже максимальная концентрация заряженных частиц в дневное время приблизительно 10^5 см^{-3} , а ночью около 10^3 см^{-3} . Ночью слой E не ослабевает, когда нет основного источника ионизации. Выше 130 км начинается слой F. В дневное время преимущественно летом в этом слое можно наблюдать два выраженных максимума: слой F1(150-200 км) и F2 (250-450 км). В этом слое максимальная концентрация электронов доходит до $10^5 - 10^6 \text{ см}^{-3}$. Также стоит заметить, что в ночное время слой F1 пропадает.

Распространение КВ радиоволн зависит от поглощения, вызванного событиями космической погоды. Большое количество затуханий

высокочастотных радиосигналов вызвано поглощением в D области ионосферы, так как при солнечных явлениях происходит возрастание электронной концентрации, благодаря чему увеличивается поглощение электромагнитных волн.

Общая электронная концентрация в D области ионосферы определена регулярным ультрафиолетовым излучением, рентгеновскими вспышками и высыпаниями энергичных частиц. В области полярной шапки доминирующий вклад в возрастание электронной концентрации связан с высыпанием энергичных частиц. Хорошо известная модель D-RAP (D Region Absorption Predictions) [<http://www.swpc.noaa.gov>] включает эмпирические модели поглощения коротких волн в D регионе вызванные рентгеновским излучением и высыпанием солнечных энергичных протонов. Эта эмпирическая модель основана на показаниях риометра. Модель D-RAP была проверена с использованием риометрических наблюдений шести станций, расположенных в средних и высоких широтах.

Применение риометрических данных для развития модели поглощения имеет некоторые ограничения. Как правило, риометры используют фиксированную частоту (в основном, около 30 МГц), что приводит к трудностям в определении частотной зависимости поглощения. D-RAP модель использует алгоритм, связанный с поглощением КВ радиоволн, вызванным высыпанием солнечных энергичных протонов. Этот алгоритм, разработанный Sauer и Wilkinson [6], основан на эмпирическом выражении для поглощения в зависимости от потока протонов. В этом алгоритме частотная зависимость поглощения исследовалась на частотах от 10 до 51 МГц. Частоты от 1 до 10 МГц не были охвачены в этих исследованиях, хотя этот диапазон имеет большое значение для моделирования высокоширотной ионосферы и высокочастотного канала. В связи с этим целью данной работы является проверка алгоритма Sauer и Wilkinson на частотах ниже 10 МГц и при необходимости его модернизации.

1. Подход к моделированию

Необходимо отметить, что описанный в данной статье подход представляет собой комбинацию методов, а именно нахождение f_{min} (точнее, метод A1, основанный на наземном вертикальном зондировании, [1]), модели D-RAP и высокоширотной ионосферы. Самая низкая частота (f_{min}) – это наименьшая частота треков на ионограмме. Обычно эти значения получают из ионограмм после масштабирования следов. При определенных обстоятельствах f_{min} , которая обычно измеряется, может работать как качественная оценка ионосферного поглощения.

В общем случае трудно интерпретировать f_{min} , как количественную оценку поглощения ионосферы, поскольку на нее сильно влияют локальные радиоволновые помехи и характеристики регистрирующей системы. В результате f_{min} не является абсолютным значением (как, например, f_oF2), и поэтому сравнение между станциями, следовательно, может быть только качественным. Другим серьезным ограничением на использование f_{min} в качестве показателя поглощения являются помехи от средневолновых сигналов от радиовещательных станций. Отношение сигнал к шуму изменяется в зависимости от частоты и влияет на уровень автоматической регулировки усиления на принимающем объекте и, как результат, на величину f_{min} .

Полезно использовать f_{min2} , который определяется как минимальная частота второго трека на ионограмме. Поскольку потери при поглощении в дБ вдвое больше при трассировке второго трека, чем для первого, то f_{min2} более чувствительна к изменениям при поглощении и менее чувствительна к конструкции оборудования, чем f_{min} . Следующим шагом является учет всей информации, содержащейся в ионограммах: f_{min} , соответствующих треков своего порядка, и амплитуд сигналов, то есть всей структуры ионограммы.

Понятно, что в случае учета поглощения расчет энергетических характеристик является важной составляющей для распространения ВЧ

сигналов и правильной интерпретации ионограмм. В настоящее время GIRO (the Global Ionospheric Radio Observatory, <http://giro.uml.edu>) обеспечивает точный профиль электронной плотности в ионосфере Земли в более чем в 60 точках мира. Файлы SAO [<http://umlcar.uml.edu/SAO-X/SAO-X.html>] представляют собой текстовые файлы формата ASCII. Каждый файл SAO содержит масштабированные данные для одной ионограммы, включая трассировки сигналов, их амплитуды, профиль электронной плотности и т. д. Создание файлов SAO совместно с имеющими ионограммами [<http://ulcar.uml.edu/DIDBase>] дает пользователям возможность напрямую интерпретировать исходные данные. Важно также отметить, что данные GIRO доступны пользователям в режиме реального времени.

Моделирование высокоширотной ионосферы и высокочастотного канала выполняется на основе модели, описанной в статье Zaalov, N.Y., Warrington, E.M., Stocker, A.J., 2005 “A ray-tracing model to account for off-great circle HF propagation over northerly paths” [2], разработанной в сотрудничестве с университетом Лестер (Великобритания). Эта вычислительная модель ионосферы с неоднородностями (патчи и арки полярной шапки, среднеширотный провал, авроральный овал) предназначена для применения к проблеме распространения высокочастотных волн.

Моделирование высокочастотного канала требует адекватной ионосферной модели. Первым шагом в моделировании ионосферы является получение фонового профиля электронной плотности ионосферы. В этой модели параметры слоев E, F1 и F2 (критическая частота, высота пиковой концентрации электронов, половина толщины слоя) извлекаются из данных вертикального зондирования [<http://giro.uml.edu/didbase/Scaled.php>]. Эта часть моделирования выполняется в среде MatLab и создается входной файл кода Fortran для трассирующих лучей. Внутри кода для отслеживания лучей были выполнены аналитические аппроксимации продольного и широтного градиентов плотности электронов.

Трехмерная процедура численного лучевого отслеживания первоначально была основана на коде Jones и Stephenson [3]. Вычисляются длина групповой и фазовой траектории и геометрическая длина пути для каждого режима распространения. В модель фоновой ионосферы вводятся модели среднеширотного провала, аврорального овала, патчи и арки полярной шапки [2], [4]. Кроме того, используется специальный интеллектуальный алгоритм «самонаведения» для повышения скорости обработки.

1.1 Модель поглощения

Как правило, чтобы оценить влияние поглощения, вычисляется затухание амплитуды волны вдоль траектории луча. В ситуациях, когда профили электронной плотности и частоты столкновений вдоль траектории луча хорошо определены, то этот метод дает хороший результат. На основе уравнений Эпполтона-Хартри в квазипродольном приближении амплитуду поглощения можно вычислить по формуле [5]:

$$\text{Absorption} \sim \int \frac{N_e \nu_{ef}}{\nu_{ef}^2 + (w \pm w_H \cos \theta)^2} dl \quad (1)$$

где ν_{ef} - эффективная частота электронно-нейтральных столкновений, N_e - электронная плотность, w - рабочая частота, w_H - электронная гирочастота, θ - угол между магнитным полем и направлением распространения волны. Левая и правая поляризации волны, моды О и Х (обыкновенная и необыкновенная волна), соответствуют знакам '+' и '-'.

Когда произошла солнечная вспышка, временные и пространственные вариации электронной плотности и частоты столкновений точно не определить, что означает, что формулу (1) трудно применить к расчетам. В этих условиях эмпирический метод оценки поглощения может быть использован для моделирования распространения радиоволн.

Вклад в поглощение, индуцированное ультрафиолетовым солнечным излучением, оценивается в децибелах по эмпирической зависимости ([8], стр. 235):

$$A_{uv} = I_0 \cdot (1 + 0.0035 \cdot S_{sn} \cdot \cos(\chi))^{0.75} / (f_{op} \pm f_l)^2 (\text{дБ}) \quad (2)$$

где $I_0=215$, потому что соответствующее поглощение для лучей, идущих вверх и вниз, рассчитывалось отдельно, S_{sn} - это число солнечных пятен, χ - солнечный зенитный угол, f_{op} - рабочая частота, f_l - продольная составляющая гирочастоты электронов. Стоит обратить внимание, что моды О и Х имеют различное поглощение.

Для расчета поглощения, вызванного рентгеновскими лучами, модель D-RAP использует данные с сайта <http://www.swpc.noaa.gov> (NOAA Space Weather Prediction Center). Затронутая самая высокая частота (The Highest Affected Frequency-HAF) вычисляется по формуле:

$$HAF = 10 \cdot \log(\text{flux} \cdot (W/m^2)) + 65 \text{ (МГц)} \quad (3)$$

Коэффициент поглощения на всех других частотах:

$$AX = 0.5 \cdot (HAF / (f_{op}))^{1.5} (\text{дБ}) \quad (4)$$

[<http://www.swpc.noaa.gov/products/d-region-absorption-predictions-drap>].

В соответствии с моделью поглощения, вызванного высыпанием энергичных частиц в области полярной шапки [6], в дневное и ночное время коэффициент поглощения (A_d и A_n) определяется интегральным потоком энергичных протонов при различных пороговых значений J и коэффициентами m_d и m_n (назначены 0,115 и 0,02, соответственно).

$$\begin{cases} A_d = m_d \cdot [J(E > 5.2 \text{ МэВ})]^{1/2} \\ A_n = m_n \cdot [J(E > 2.2 \text{ МэВ})]^{1/2} \end{cases} \text{ (дБ)} \quad (5)$$

Ночное поглощение (когда угол возвышения Солнца находится между -10° и 10°) на частоте 30 МГц:

$$A_{30} = A_d \cdot (El + 10^\circ) / 20^\circ - A_n \cdot (El - 10^\circ) / 20^\circ \text{ (дБ)} \quad (6)$$

где El - это солнечный угол возвышения [6].

Поглощение на другой частоте определяется соотношением:

$$A_f = (30/f)^{1.5} \cdot A_{30} \text{ (дБ)} \quad (7)$$

Некоторые применения этой модели для оценки поглощения в области полярной шапки можно найти в [7].

1.2 Модификация модели поглощения

Треки, связанные с различными магнитно-ионными компонентами, проявляются в структурах вертикальных и наклонных ионограммах в диапазоне частот от 1 до 20 МГц. Моды с О- и Х-поляризацией отличаются особенно при вертикальном зондировании (как правило, от 1 до 10 МГц). Интенсивность треков, соответствующих О- и Х-мод, отличается, которая зависит от разницы поглощения мод при распространении. Следовательно, необходимо учитывать это явление в моделировании высокочастотного радиоканала.

Компьютерная модель, описанная в данной работе, учитывает магнитно-ионное расщепление мод при распространении. Расхождение поглощения между модами с различной поляризацией оценивается путем введения термина продольной составляющей гирочастот как в формуле (2). Знаки \pm соответствуют различным поляризациям волны (моды О и Х).

$$AX = 0.5 \cdot (NAF / (f_{op} \pm f_l))^{1.5} \text{ (дБ)} \quad (8)$$

$$A_f = (30/f \pm f_l)^{1.5} \cdot A_{30} \text{ (дБ)} \quad (9)$$

Но в данной работе ввиду большой продолжительности процедуры вычисления моделировались моды только обыкновенных волн.

В целом, частотная зависимость поглощения определяется формулой (1). В различных работах были представлены эмпирические частотные зависимости поглощения на основе показаний риометров. Davies ([8], стр. 235) определяет частотную зависимость коэффициента поглощения при ультрафиолетовом излучении от частоты сигнала как функцию f^{-2} (формула (2)). Измерения на основе метода АЗ выполняли для низких широт и использовали 5 частот: 4.87 МГц, 5.05 МГц, 6.09 МГц, 9.60 МГц и 15.40 МГц, [9]. Эти измерения показали большое отклонение в значении μ (от 0,8 до 2,34) в допущении, что частотная зависимость подчиняется закону f^{-np} . Модель D-RAP принимает частотную зависимость коэффициента поглощения для рентгеновских лучей, как $f^{-1,5}$ (формула (4)). Schumer, проанализировав показания риометра, выявил зависимость коэффициента поглощения для рентгеновских лучей от частоты сигнала, как $f^{-1,24}$ [10]. Для расчета поглощения во время высыпания протонов используется частотная зависимость $f^{-1,5}$ (формула (7)) [6]. Разумно предположить, что показатель степени в частотной зависимости поглощения определяется не лучшим образом (особенно на низких частотах) из-за его эмпирического определения, поэтому этот показатель степени должен быть предметом дополнительного исследования.

В этой работе предложена расширенная частотная зависимость поглощения, вызванного высыпанием протонов, начиная с 1 МГц. Эта зависимость выявляется с помощью анализа как моделированной, так и экспериментальной структуры вертикальных ионограмм. Значения самой низкой наблюдаемой частоты для различных скачков в ионограммах определяет поглощение, соответствующие этим частотам. Анализ данных

ионозондов позволяет определить самую низкую наблюдаемую частоту для каждого скачка, связанного с отражением от E, F1 и F2 слоев.

Вполне логично предположить, что значение показателя в частотной зависимости поглощения не является постоянной величиной, а изменяется от -1,5 (модель D-RAP) до -2 (формула (2) [8]), так как высота точки поворота радиоволны зависит от частоты. Для того чтобы оставаться как можно ближе к D-RAP модели, предложена довольно простая функция частотной зависимости коэффициента поглощения как f^{-np} . Эта функция действует на частоте, начиная с 1 МГц и выглядит следующим образом:

$$A_f = (30/f)^{np} \cdot A_{30}(\text{дБ}) \quad (10)$$

где $np = 0.5 \cdot e^{-(f/f_0)^{p_0}} + 1.5$. Параметры, определяющие np , были приняты следующие: $f_0 = 5$ МГц, $p_0 = 6$. Соответствующие параметры в формуле (10) были найдены путем сравнения значений минимальных наблюдаемых частот из моделируемых и экспериментальных ионограмм.

Можно согласиться, что выражение для частотной зависимости поглощения имеет довольно общий характер (т.е. существенно не изменяется во времени и пространстве). На частотах свыше 10 МГц модифицированная частотная зависимость соответствует D-RAP модели, одобренной для этого диапазона [<http://www.swpc.noaa.gov/products/d-region-absorption-predictions-drap>]. Предложенная частотная зависимость поглощения была подтверждена данными целого ряда ионозондов в диапазоне событий солнечных вспышек.

1.3 Оптимизация коэффициентов m_d и m_n

В данной работе был предложен метод для оптимизации коэффициентов m_d и m_n , которые относятся к коэффициенту поглощения.

Основная идея такого метода заключается в том, что изменяя коэффициенты поглощения при моделировании, можно приблизительно

определить m_d и m_n путем сравнения моделируемых ионограмм с экспериментальными. В то же время значения пересмотренных коэффициентов поглощения могут быть применены для расчета поглощения во всей области полярной шапки.

2. Экспериментальные ионограммы

В этой работе данные вертикального зондирования были получены от «The Lowell Digital Ionogram Data Base» (DIDBase) [<http://ulcar.uml.edu/DIDBase/>]. Важно отметить, что уровень сигнала является одним из наименее понятных параметров, характеризующих ВЧ сигналы, и является одним из самых сложных, который можно измерить с помощью метода калибровки. SAO Explorer [<http://umicar.uml.edu/SAO-X/SAO-X.html>], который предназначен для обработки данных вертикального зондирования, предоставляет углы прибытия и ряд энергетических характеристик принимаемых сигналов. Использование файлов SAO вместе с доступными построенными ионограммами дает пользователям возможность интерпретировать исходные данные напрямую.

Например, на рис.1-а показана ионограмма, демонстрирующая уровень сигнала (изображен в цветовой шкале справа) для ионозонда, расположенного в Sondrestrom 23 октября 2011 года в 13:00 UT. Следует отметить, что на ионограмме наблюдаются отделенные вертикальные полосы, вызванные автоматической регулировкой усиления (APУ). Понятно, что технические характеристики оборудования существенно влияют на структуру ионограмм. Ряд параметров антенны и питающей линии (импеданс, сопротивление излучения, ширина полосы пропускания, диаграммы направленности и т.д.) влияют на мощность принимаемого сигнала. Отношение сигнал-шум изменяется в зависимости от частоты и влияет на уровень автоматической регулировки усиления на приемном участке. Поэтому масштаб в ионограммах, связанный с уровнем различных мод распространения, показывает точное

относительное отношение интенсивности различных мод на каждой фиксированной частоте, но не во всей полосе частот.

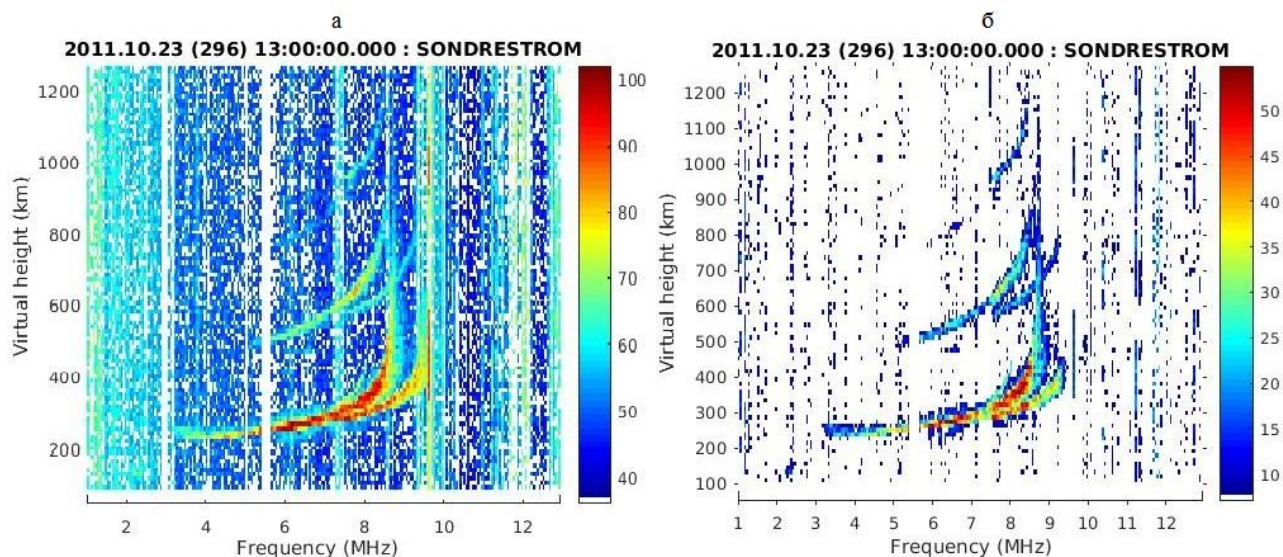


Рис.1 Данные вертикального зондирования, полученные в Sondrestrom 23 октября 2011 года в 13:00 UT. Панель (а): ионограмма, построенная при помощи SAO Explorer [<http://umlcar.uml.edu/SAO-X/SAO-X.html>]. Панель (б): очищенная ионограмма с учетом АРУ.

В этой работе ионограммы, экспериментально полученные при помощи базы данных SAO Explorer и пакета программ среды Матлаб (рис. 1-а), уточняются, чтобы уменьшить влияние АРУ. Следует обратить внимание, что исходный уровень в дБ определяется программным обеспечением сайта SAO Explorer и указывает на абсолютную мощность, соответствующую различным трекам ионограмм. Обработанная ионограмма показана на рис. 1-б. Уровень сигнала в дБ показан на цветовой шкале справа. Был применен эвристический подход к переработке ионограмм в том смысле, что предполагается, что уровень шума, вычисленный в диапазоне высот, где явно не наблюдаются треки ионограммы, может быть использован в качестве фактора для переоценки уровня сигнала. Следует отметить, что после применения этой процедуры к ионограмме динамический диапазон уровня сигнала был изменен приблизительно на величину 40 дБ в данном конкретном случае.

В этой работе представлены ионограммы для станций Qaanaaq (77.50° N, 290.80°E) и Sondrestrom (66.98° N, 309,1°E). События высыпания протонов исследуются 23 октября 2011 года и 2 апреля 2011 года. В течение этих дней уровень потока рентгеновского излучения не превышает $2.4 \cdot 10^{-6} \text{ Вт/м}^2$ на 23 октября 2011 года и $2.5 \cdot 10^{-6} \text{ Вт/м}^2$ на 2 апреля 2011 года и почти не влияет на поглощение ВЧ радиоволн (см. [6]). 23 октября 2011 года и 2 апреля 2011 характеризовались тихой геофизической обстановкой (индекс K_p был равен 2 и 3 и число солнечных пятен были равны 164 и 62, соответственно [<http://spaceweather.com/>]). Наблюдения спутника GOES-15 для интегрального потока протонов и рентгеновского излучения приведены на рис. 2 и 3.

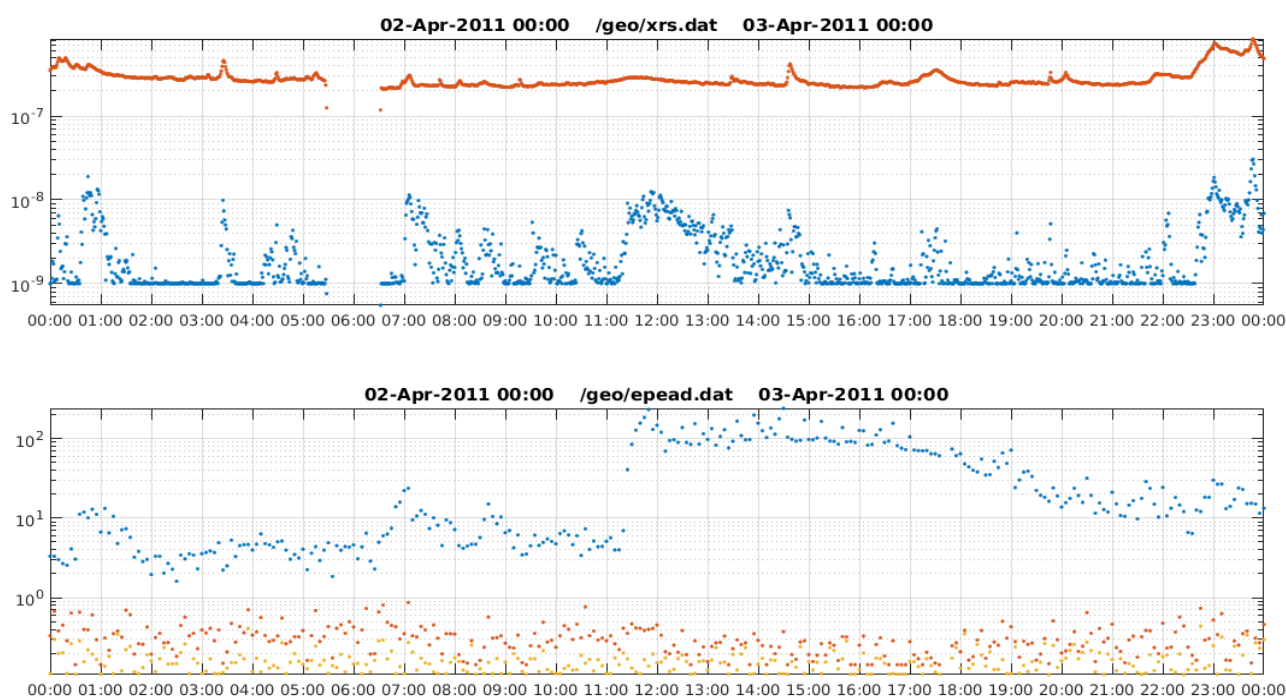


Рис. 2. Спутниковые наблюдения GOES-15 интегрального потока протонов [п/(см²·с·ср)] при трех пороговых энергиях ($E > 1 \text{ МэВ}$, $> 5 \text{ МэВ}$, $> 10 \text{ МэВ}$) и рентгеновского излучения [Вт/м²] на 2 апреля 2011 года.

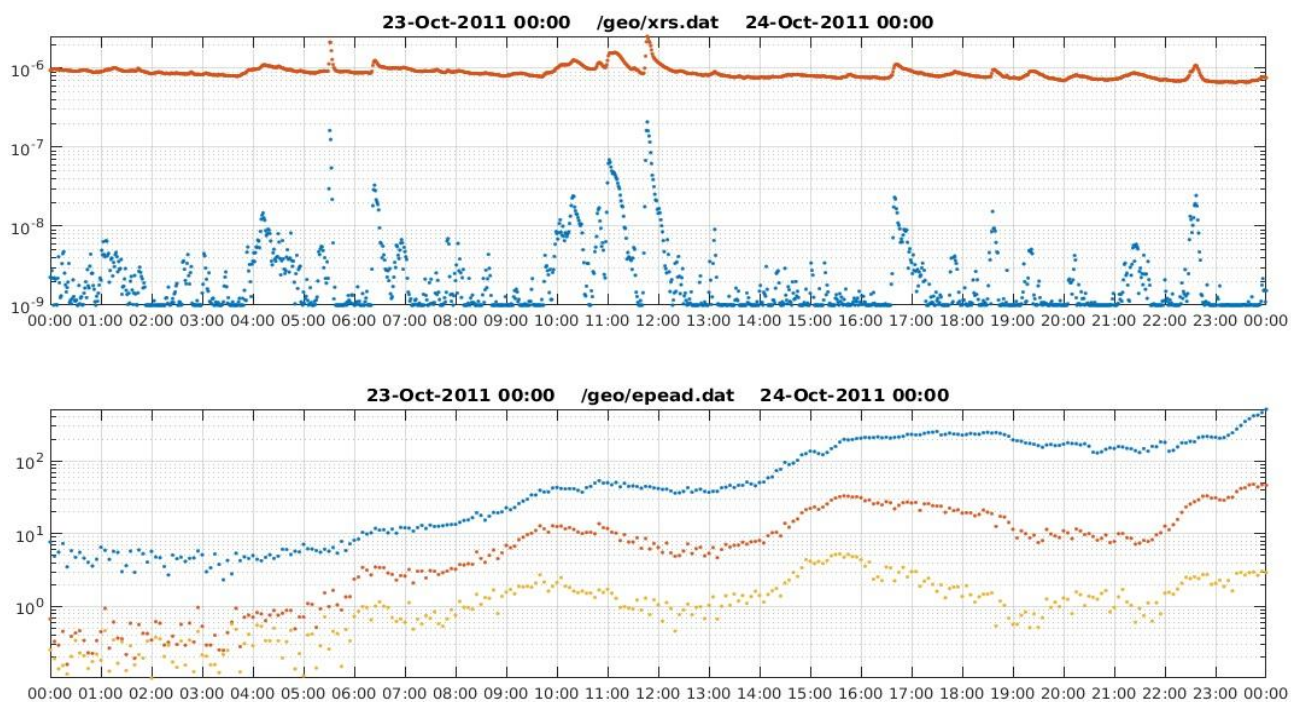


Рис. 3. Спутниковые наблюдения GOES-15 интегрального потока протонов [$\text{п}/(\text{см}^2 \cdot \text{с} \cdot \text{ср})$] при трех пороговых энергиях ($E > 1 \text{ МэВ}$, $> 5 \text{ МэВ}$, $> 10 \text{ МэВ}$) и рентгеновского излучения [$\text{Вт}/\text{м}^2$] на 23 октября 2011 года.

На рис. 2 и 3 верхняя панель представляет собой поток рентгеновского излучения, а нижняя панель поток протонов при трех пороговых энергиях, соответствующих 2 апреля 2011 года и 23 октября 2011 года соответственно. Причем на нижней панели рис. 2 и 3 синий цвет соответствует потоку протонов для энергий больше 1 МэВ, красный цвет для энергий больше 5 МэВ, желтый цвет для энергий больше 10 МэВ. Наиболее интересны для обсуждения интервалы времени с повышенной интенсивностью высыпаний протонов. 2 апреля 2011 года энергичный поток протонов начинает существенно давать вклад в поглощение в 11:30 UT, а 23 октября 2011 года - в 14:15 UT.

3. Проверка метода. Результат моделированных ионограмм

Проверка оптимизированной модели поглощения была выполнена путем сравнения моделированных ионограмм с экспериментальными на основе данных вертикального зондирования и солнечных событий.

3.1 Частотная зависимость поглощения

Результаты модифицированной частотной зависимости поглощения представлены на рис. 4 и 5. Рис. 4 и рис. 5 состоят из трех столбцов и четырех рядов. Данные ионозонда показаны в столбце (a). Моделированные ионограммы в соответствии с частотной зависимостью для формулы (7) [6], представлены в столбце (b). Моделированные ионограммы, в соответствии с оптимизированной частотной зависимостью для формулы (10), изображены в столбце (c). Коэффициенты m_d и m_n используются как 0.115 и 0.02 в данном конкретном случае, то есть они соответствуют модели D-RAP.

На рис. 4 (ряд 1 и 3) мы наблюдаем ионограммы для станции Sondrestrom 23 октября 2011 года 15:00 UT и 15:30 UT соответственно. В первом столбце на экспериментальных ионограммах мы наблюдаем два скачка, оба вызваны отражением от F слоя. Аналогично, первые и вторые скачки, ассоциирующие отражением от F-слоя, наблюдаются на всех моделируемых ионограммах (рис. 4, столбцы (b) и (c), ряд 1 и 3). Два скачки от E-слоя наблюдаются в столбце (b), в то время как в столбце (c) вторые скачки от E слоя исчезли. Также стоит отметить факт появления третьего скачка от F слоя в столбце (b) и (c) (ряд 2 и 4). Кроме того, наблюдаются самые низкие частоты скачков от F слоя (рис.4, столбец (c), ряд 1 и 3).

На рис. 4 (ряд 2 и 4) представлены ионограммы для станции Qaanaaq в те же участки времени, что и на рис. 4 для рядов 1 и 3. На экспериментальной ионограмме мы уже наблюдаем три скачка от F слоя (ряд 2) и один скачок от F слоя (ряд 4). Стоит заметить, что на моделируемой ионограмме в столбце (b), помимо трех скачков от F слоя, мы видим след первого скачка от E слоя, но в

столбце (с) он пропадает и остаются только три скачка от F слоя. Можно увидеть, что в ряду 4 в столбце (с) следы второго и третьего скачка от F слоя не исчезли, но минимальная частота первого скачка совпадает с минимальной частотой для экспериментальной ионограммы. В целом, при рассмотрении таблиц 1-4, можно сделать вывод, что модифицированная частотная зависимость дает лучший результат по отношению к модулируемым ионограммам, использующих частотную зависимость по формуле (7).

Рассмотрим другой пример. На рис. 5 в ряду 1 и 3 представлены ионограммы для станции Sondrestrom для 2 апреля 2011 года. Ряд 1 для 11:45 UT, ряд 3 для 12:15 UT. Экспериментальные ионограммы представляют один скачок от F слоя (для 1 и 3 ряда). В столбце (b) для ряда 1 мы наблюдаем два скачка от E слоя и три от F слоя, но в столбце (с) 1 скачок от E слоя и два от F слоя. При рассмотрении 3 ряда, видно, что в столбце (b) два скачка от E и два от F, в столбце (с) остались уже 1 скачок от E слоя и 1 от F слоя, что также показывает, что ионограммы, построенные при помощи модифицированной частотной зависимости, приближенно совпадают с экспериментальными ионограммами.

Для рядов 2 и 4 (рис. 5) показаны ионограммы для станции Qaanaaq для 11:30 UT и 12:15 UT соответственно. Экспериментальные ионограммы (столбец (a)) представляют уже более сложную структуру. Для рядов 2 и 4 экспериментальная ионограмма представляет собой два скачка от E слоя и четыре скачка от F слоя. Стоит обратить внимание, что в столбцах (b) и (с) четвертый скачок от F слоя не наблюдается, но сохранились два скачка от E слоя. Вообще стоит сказать, что модифицированная частотная зависимость хорошо работает для большинства случаев. Но, если взглянуть на таблицы 6, то можно заметить что это именно тот случай, когда моделируемая ионограмма, выполненная при помощи улучшенной частотной зависимости, не дает лучшего результата по отношению моделируемой ионограммы в столбце (b). Для ряда 4 и при рассмотрении таблицы 8 видно, что только минимальная частота (столбец

(с)) второго скачка от Е слоя совпадает с минимальной частотой второго скачка от Е слоя экспериментальной ионограммы (столбец (а)).

На основе этих двух дней можно сделать вывод, что необходимо изменить коэффициенты m_d и m_n .

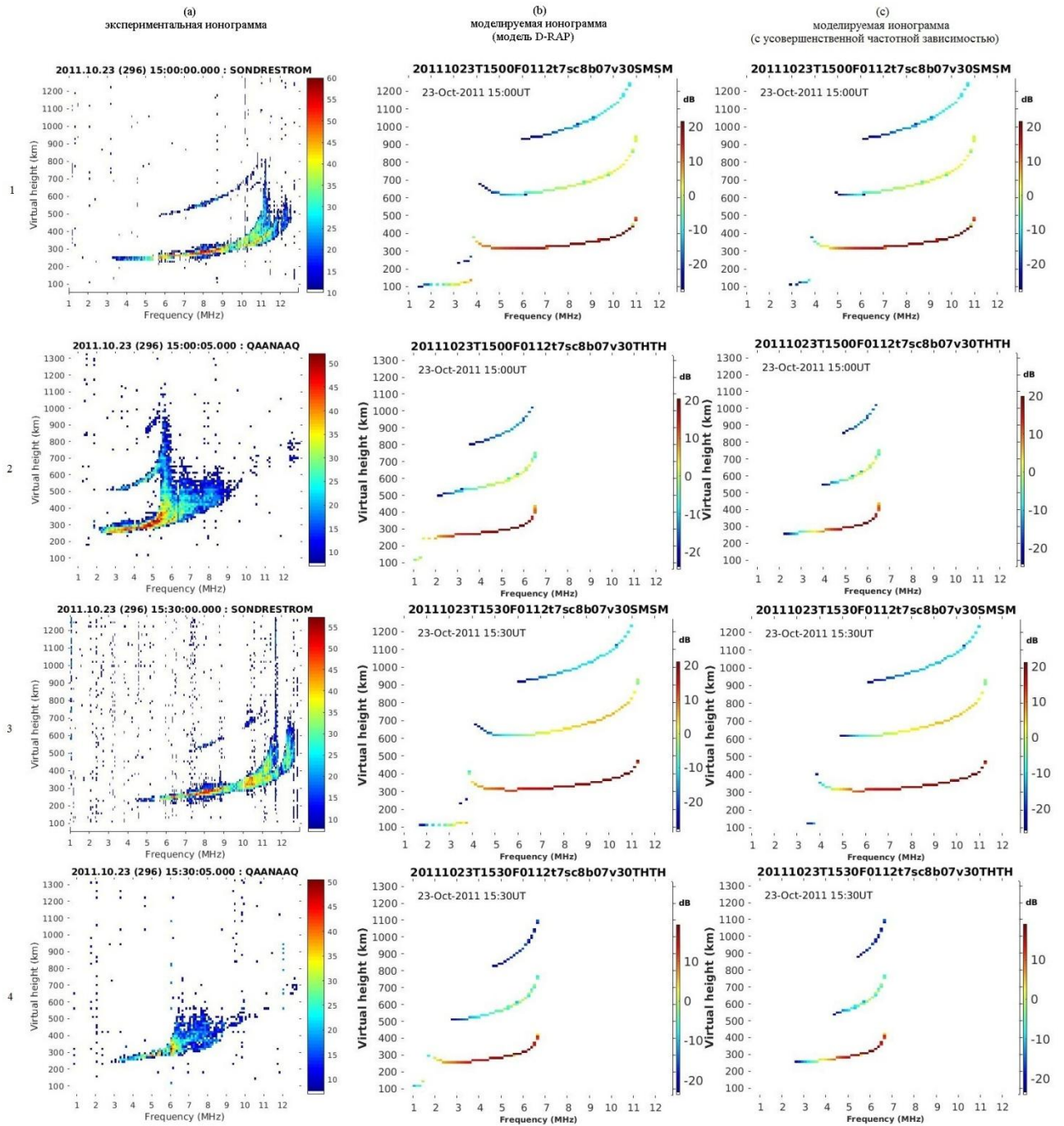


Рис. 4. Частотная зависимость амплитуды поглощения. Столбец (а): экспериментальные ионограммы, Столбец (б): моделируемые ионограммы с частотной зависимостью, основанной на модели D-RAP. Столбец (с): моделируемые ионограммы с улучшенной частотной зависимостью. Ряды 1и 3: Sondrestrom 2011 год 15:00 UT и 15:30 UT соответственно. Ряды 2и 4: Qaanaaq 2011 год 15:00 UT и 15:30 UT соответственно. Коэффициенты $m_d=0.115$ и $m_n=0.02$.

Наименьшие частоты скачков	Экспериментальная ионограмма	D-RAP модель	Моделированная ионограмма
1 скачок от E слоя	-	1.4 МГц	2.9 МГц
2 скачок от E слоя	-	3.1 МГц	-
1 скачок от F слоя	3.3 МГц	3.8 МГц	3.8 МГц
2 скачок от F слоя	5.7 МГц	4.1 МГц	4.9 МГц
3 скачок от F слоя	-	6.0 МГц	6.1 МГц

Таблица 1. Sondrestrom 2011 год 23 октября 15:00 UT (рис. 4, ряд 1)

Наименьшие частоты скачков	Экспериментальная ионограмма	D-RAP модель	моделированная ионограмма
1 скачок от E слоя	-	1.0 МГц	-
2 скачок от E слоя	-	-	-
1 скачок от F слоя	2.1 МГц	1.4 МГц	2.2 МГц
2 скачок от F слоя	2.5 МГц	2.1 МГц	3.9 МГц
3 скачок от F слоя	4.5 МГц	3.5 МГц	4.9 МГц

Таблица 2. Qaanaq 2011 год 23 октября 15:00 UT (рис. 4, ряд 2)

Наименьшие частоты скачков	Экспериментальная ионограмма	D-RAP модель	моделированная ионограмма
1 скачок от E слоя	-	1.7 МГц	3.4 МГц
2 скачок от E слоя	-	3.7 МГц	-
1 скачок от F слоя	4.5 МГц	3.8 МГц	3.8 МГц
2 скачок от F слоя	7.5 МГц	4.1 МГц	4.9 МГц
3 скачок от F слоя	-	6.1 МГц	6.1 МГц

Таблица 3. Sondrestrom 2011 год 23 октября 15:30 UT (рис. 4, ряд 3)

Наименьшие частоты скачков	Экспериментальная ионограмма	D-RAP модель	моделированная ионограмма
1 скачок от E слоя	-	1.0 МГц	-
2 скачок от E слоя	-	-	-
1 скачок от F слоя	2.8 МГц	1.4 МГц	2.2 МГц
2 скачок от F слоя	-	2.1 МГц	3.9 МГц
3 скачок от F слоя	-	3.5 МГц	4.9 МГц

Таблица 4. Qaanaaq 2011 год 23 октября 15:30 UT (рис. 4, ряд 4)

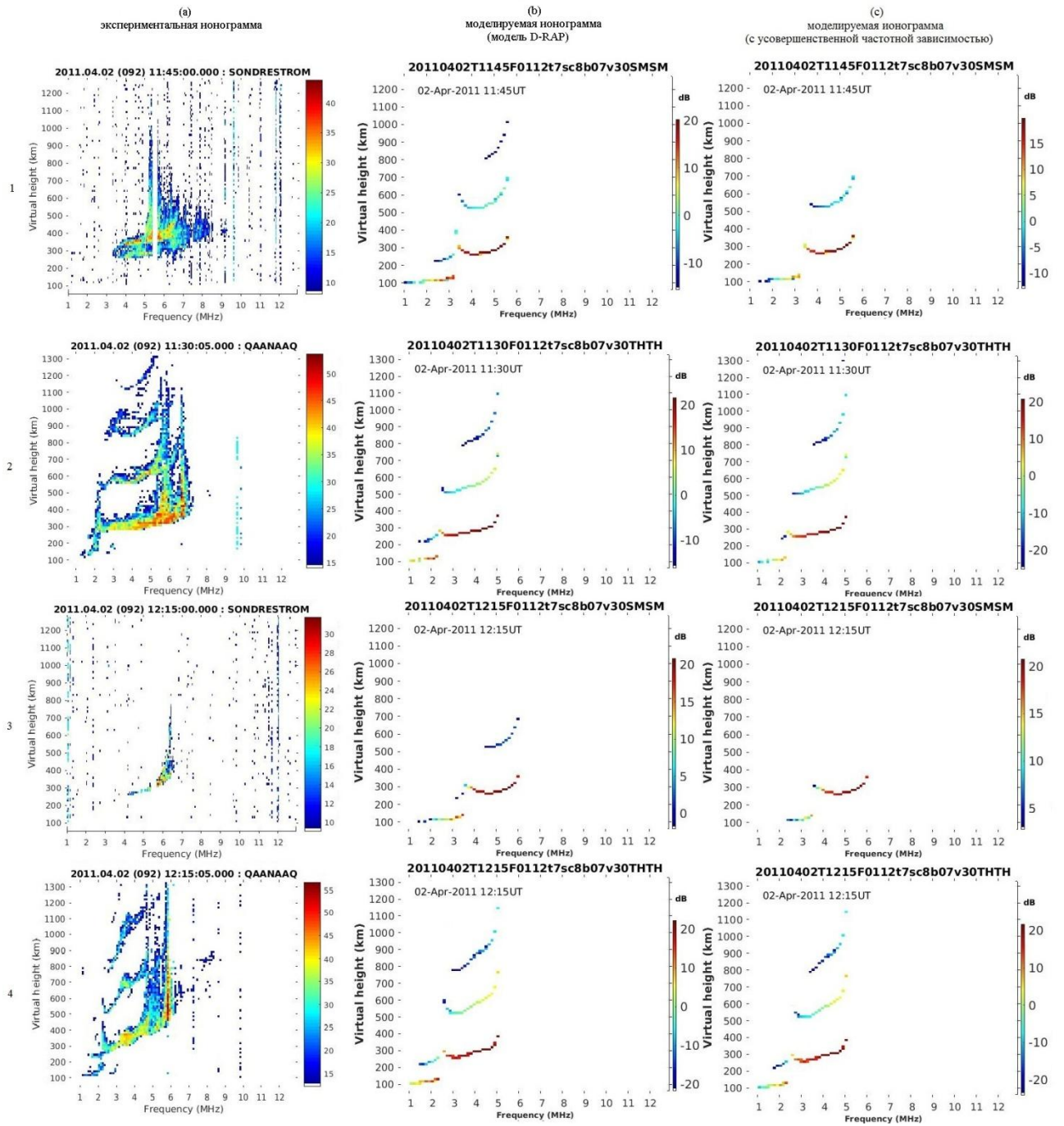


Рис. 5. Частотная зависимость амплитуды поглощения. Столбец (a): экспериментальные ионограммы, Столбец (b): моделируемые ионограммы с частотной зависимостью, основанной на модели D-RAP. Столбец (c): моделируемые ионограммы с улучшенной частотной зависимостью. Ряды 1 и 3: Sondrestrom 2011 год 11:45 UT и 12:15 UT соответственно. Ряды 2и 4: Qaanaaq 2011 год 11:30 UT и 12:15 UT соответственно. Коэффициенты $m_d=0.115$ и $m_n=0.02$.

Наименьшие частоты скачков	Экспериментальная ионограмма	D-RAP модель	моделированная ионограмма
1 скачок от E слоя	-	1.0 МГц	1.4 МГц
2 скачок от E слоя	-	2.3 МГц	-
1 скачок от F слоя	3.3 МГц	3.4 МГц	3.4 МГц
2 скачок от F слоя	-	3.4 МГц	3.7 МГц
3 скачок от F слоя	-	4.6 МГц	-

Таблица 5. Sondrestrom 2011 год 2 апреля 11:45 UT (рис. 5, ряд 1)

Наименьшие частоты скачков	Экспериментальная ионограмма	D-RAP модель	моделированная ионограмма
1 скачок от E слоя	1.3 МГц	1.0 МГц	1.0 МГц
2 скачок от E слоя	1.6 МГц	1.4 МГц	2.0 МГц
1 скачок от F слоя	2.2 МГц	2.3 МГц	2.3 МГц
2 скачок от F слоя	2.3 МГц	2.5 МГц	2.4 МГц
3 скачок от F слоя	2.7 МГц	3.4 МГц	3.5 МГц
4 скачок от F слоя	2.8 МГц	-	-

Таблица 6. Qaanaaq 2011 год 2 апреля 11:30 UT (рис. 5, ряд 2)

Наименьшие частоты скачков	Экспериментальная ионограмма	D-RAP модель	моделированная ионограмма
1 скачок от E слоя	-	1.4 МГц	2.3 МГц
2 скачок от E слоя	-	3.1 МГц	-
1 скачок от F слоя	4.2 МГц	3.5 МГц	3.5 МГц
2 скачок от F слоя	-	4.5 МГц	-
3 скачок от F слоя	-	-	-

Таблица 7. Sondrestrom 2011 год 2 апреля 12:15 UT (рис. 5, ряд 3)

Наименьшие частоты скачков	Экспериментальная ионограмма	D-RAP модель	моделированная ионограмма
1 скачок от E слоя	1.1 МГц	1.0 МГц	1.0 МГц
2 скачок от E слоя	1.6 МГц	1.4 МГц	1.6 МГц
1 скачок от F слоя	2.2 МГц	2.5 МГц	2.5 МГц
2 скачок от F слоя	2.3 МГц	2.5 МГц	2.5 МГц
3 скачок от F слоя	2.6 МГц	3.0 МГц	3.3 МГц
1 скачок от E слоя	2.8 МГц	-	-

Таблица 8. Qaanaaq 2011 год 2 апреля 12:15 UT (рис. 5, ряд 4)

3.3 Оптимизация коэффициентов m_d и m_n

Результаты оптимизации коэффициентов m_d и m_n представлены на рис. 6 и 7. для 23 октября 2011 года и 2 апреля 2011 года для двух станций Sondrestrom и Qaanaaq. Данные ионозонда представлены в столбце (а). В столбце (b) изображены ионограммы, моделированные на основе модели D-RAP. Моделированные ионограммы с пересмотренными коэффициентами m_d и m_n и улучшенной частотной зависимостью поглощения, представлены в столбце (с) на рис. 6 и 7. Коэффициенты m_d и m_n подбирались таким образом, чтобы минимальные частоты экспериментальных ионограмм (столбец (а)) были близки к минимальным частотам моделированных ионограмм (столбец (с)).

На рис. 6 для рядов 1 и 3 изображены ионограммы для ионозонда Sondrestrom для 23 октября 2011 года 12:15 UT и 13:45 UT соответственно. При коэффициентах $m_d=0.15$ и $m_n=0.02$ видим, что по сравнению с D-RAP моделью моделированные ионограммы с улучшенной частотной зависимостью и при данных коэффициентах сохраняют такую же структуру, что и для экспериментальных ионограмм. Причем их значения минимальных частот скачков расположены близко к друг другу, что подтверждают таблицы 9 и 11.

На рис. 6 в рядах 2 и 4 моделированы ионограммы с улучшенной частотной зависимостью с такими же коэффициентами $m_d=0.15$ и $m_n=0.02$ для ионозонда Qaanaaq для 2 апреля 2011 года 12:15 UT и 13:45 UT соответственно. В ряду 2 и 4 для мы наблюдаем одинаковую структуру ионограмм и близкое расположение минимальных частот скачков (таблица 10 и 12) для столбцов (1) и (3), за исключением того, что в ряду 4 для моделированной ионограммы мы наблюдаем три скачка, а для экспериментальной ионограммы всего два.

На рисунке 7 представлены ионограммы для ионозондов Sondrestrom (ряд 1 и 3) и Qaanaaq (ряд 2 и 4) для 4 апреля 2011 года 12:15 UT и 13:45 UT. Для моделирования ионограмм для ионозонда Qaanaaq брались $m_d=0.15$ и

$m_n=0.02$, но для Sondrestrom $m_d=0.29$ и $m_n=0.02$. При этих коэффициентах нам удалось получить приблизительно равные значения минимальных частот скачков и получить одинаковую структуру для экспериментальных и моделируемых ионограмм. Но в ряду 2 для ионозонда Qaanaaq в 12:15 UT, проанализировав таблицу 14, видно, что минимальная частота для четвертого скачка экспериментальной ионограммы (столбец а) не соответствует минимальной частоте для моделируемой ионограммы с усовершенствованной частотной зависимостью поглощения при $m_d=0.15$ и $m_n=0.02$. Также можно заметить что, на ионограмме для Sondrestrom в 13:45 UT (ряд 3, столбец (с)) след от Е слоя первого скачка поглотился не полностью.

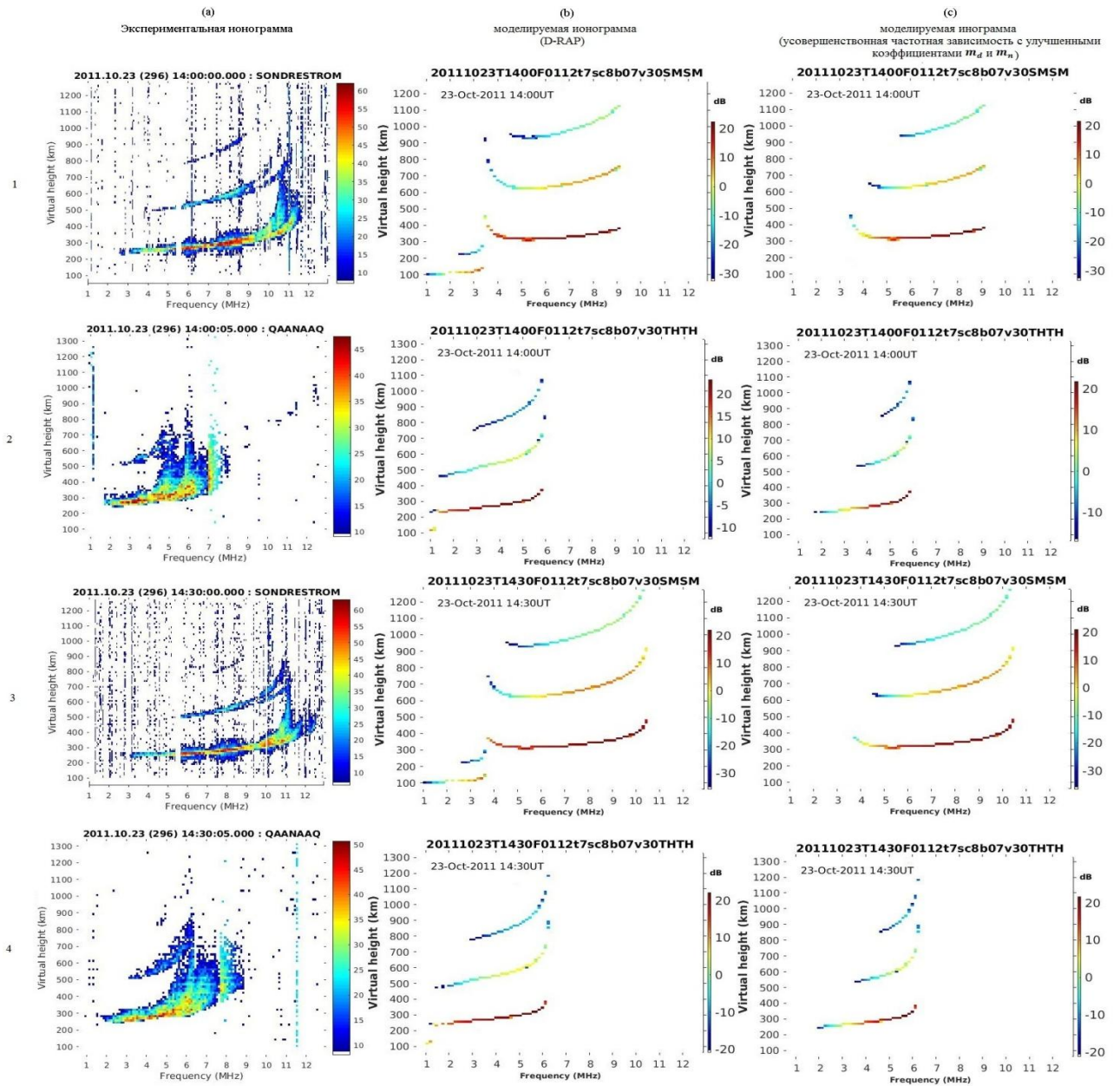


Рис. 6. Оптимизация коэффициентов m_d и m_n . Столбец (a): экспериментальные ионограммы, Столбец (b): моделируемые ионограммы с частотной зависимостью, основанной на модели D-RAP ($m_d=0.115$ и $m_n=0.02$). Столбец (c): моделируемые ионограммы с улучшенной частотной зависимостью $m_d=0.15$ и $m_n=0.02$. Ряд 1 и 3: Sondrestrom 14:00 UT и 14:30 UT соответственно. Ряд 2 и 4: Qaanaaq 14:00 UT и 14:30 UT соответственно.

Наименьшие частоты скачков	Экспериментальная ионограмма	D-RAP модель	моделированная ионограмма
1 скачок от E слоя	-	1.0 МГц	-
2 скачок от E слоя	-	2.3 МГц	-
1 скачок от F слоя	2.6 МГц	3.4 МГц	3.4 МГц
2 скачок от F слоя	4.3 МГц	3.4 МГц	4.2 МГц
3 скачок от F слоя	5.8 МГц	4.5 МГц	5.2 МГц

Таблица 9. Sondrestrom 2011 год 23 октября 14:00 UT (рис. 6, ряд 1)

Наименьшие частоты скачков	Экспериментальная ионограмма	D-RAP модель	моделированная ионограмма
1 скачок от E слоя	-	1.0 МГц	-
2 скачок от E слоя	-	1.0 МГц	-
1 скачок от F слоя	1.7 МГц	1.2 МГц	1.7 МГц
2 скачок от F слоя	2.5 МГц	1.4 МГц	3.5 МГц
3 скачок от F слоя	-	2.8 МГц	4.6 МГц

Таблица 10. Qaanaaq 2011 год 23 октября 14:00 UT (рис. 6, ряд 2)

Наименьшие частоты скачков	Экспериментальная ионограмма	D-RAP модель	моделированная ионограмма
1 скачок от E слоя	-	1.0 МГц	2.9
2 скачок от E слоя	-	2.6 МГц	-
1 скачок от F слоя	3.2 МГц	3.7 МГц	3.7 МГц
2 скачок от F слоя	5.3 МГц	3.4 МГц	4.5 МГц
3 скачок от F слоя	7.4 МГц	4.5 МГц	5.4 МГц

Таблица 11. Sondrestrom 2011 год 23 октября 14:30 UT (рис. 6, ряд 3)

Наименьшие частоты скачков	Экспериментальная ионограмма	D-RAP модель	моделированная ионограмма
1 скачок от E слоя	-	1.0 МГц	-
2 скачок от E слоя	-	1.1 МГц	-
1 скачок от F слоя	1.7 МГц	1.3 МГц	1.8 МГц
2 скачок от F слоя	3.1 МГц	1.4 МГц	3.4 МГц
3 скачок от F слоя	4.5 МГц	2.9 МГц	4.6 МГц

Таблица 12. Qaanaaq 2011 год 23 октября 14:30 UT (рис. 6, ряд 4)

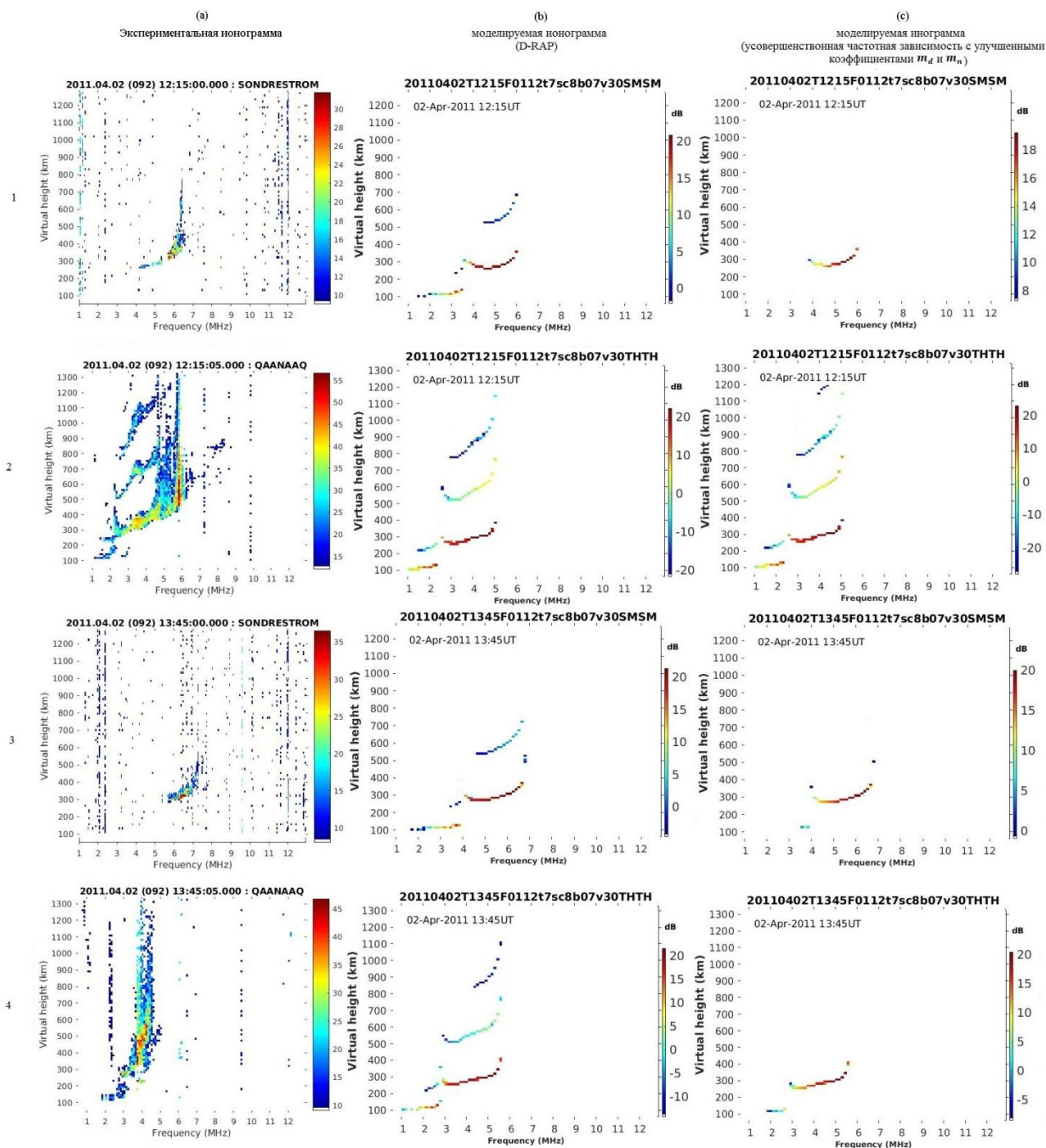


Рис. 7. Оптимизация коэффициентов m_d и m_n . Столбец (a): экспериментальные ионограммы, Столбец (b): моделируемые ионограммы с частотной зависимостью, основанной на модели D-RAP ($m_d=0.115$ и $m_n=0.02$). Столбец (c): моделируемые ионограммы с улучшенной частотной зависимостью и оптимизированными m_d и m_n . Ряд 1 и 3: Sondrestrom 12:15 UT и 13:45 UT соответственно. Ряд 2 и 4: Qaanaaq 12:15 UT и 13:45 UT соответственно.

Наименьшие частоты скачков	Экспериментальная ионограмма	D-RAP модель	моделированная ионограмма
1 скачок от E слоя	-	1.4 МГц	-
2 скачок от E слоя	-	3.1 МГц	-
1 скачок от F слоя	4.2 МГц	3.5 МГц	3.8 МГц
2 скачок от F слоя	-	4.5 МГц	-
3 скачок от F слоя	-	-	-

Таблица 13. Sondrestrom 2011 год 2 апреля 12:15 UT (рис. 7, ряд 1)

Наименьшие частоты скачков	Экспериментальная ионограмма	D-RAP модель	моделированная ионограмма
1 скачок от E слоя	1.1 МГц	1.0 МГц	1.0 МГц
2 скачок от E слоя	1.6 МГц	1.4 МГц	1.5 МГц
1 скачок от F слоя	2.2 МГц	2.5 МГц	2.5 МГц
2 скачок от F слоя	2.3 МГц	2.5 МГц	2.5 МГц
3 скачок от F слоя	2.4 МГц	3.0	2.9 МГц
4 скачок от F слоя	2.6 МГц	-	4.0 МГц

Таблица 14. Qaanaaq 2011 год 2 апреля 12:15 UT (рис. 7, ряд 2)

Наименьшие частоты скачков	Экспериментальная ионограмма	D-RAP модель	моделированная ионограмма
1 скачок от E слоя	-	1.7 МГц	3.5 МГц
2 скачок от E слоя	-	3.4 МГц	-
1 скачок от F слоя	5.6 МГц	4.0 МГц	4.2 МГц
2 скачок от F слоя	-	4.6 МГц	
3 скачок от F слоя	-	-	-

Таблица 15. Sondrestrom 2011 год апреля 13:45 UT (рис. 7, ряд 3)

Наименьшие частоты скачков	Экспериментальная ионограмма	D-RAP модель	моделированная ионограмма
1 скачок от E слоя	1.7 МГц	1.0 МГц	1.5
2 скачок от E слоя	-	2.0 МГц	-
1 скачок от F слоя	2.8 МГц	2.8 МГц	2.9 МГц
2 скачок от F слоя	-	2.9 МГц	-
3 скачок от F слоя	-	4.3	-

Таблица 16. Qaanaaq 2011 год апреля 13:45 UT (рис. 7, ряд 4)

Вывод

В данной работе мы исследовали алгоритм Sauer и Wilkinson на частотах ниже 10 МГц. Этот алгоритм мы исследовали для 2 апреля и 23 октября 2011 года, опираясь на данные вертикального зондирования от двух ионозондов Sondrestrom и Qaanaaq. Нами было выявлено, что при данном алгоритме экспериментальные ионограммы не совпадали с моделированными ионограммами, выполненными при помощи формулы (7). Это хорошо продемонстрировано на рис. 4-7 (столбец (a) и столбец (b))

Для улучшения данного алгоритма была предложена улучшенная эмпирическая частотная зависимость коэффициента поглощения (формула 10). Моделированные ионограммы, выполненные при помощи улучшенной частотной зависимости, структурой были больше похожи на экспериментальные ионограммы, как было показано на рис. 4-5 (столбец (a) и (c)). Опираясь на таблицы 1-8, было видно, что не все минимальные частоты скачков на моделируемых ионограммах были приблизительно равны минимальным частотам скачков на соответствующих экспериментальных ионограммах. Поэтому была предложена оптимизация коэффициентов m_d и m_n . Для ионограмм, полученных для ионозондов Sondrestrom и Qaanaaq 23 октября 2011 года 14:00 UT и 14:30 UT, $m_d=0.15$ и $m_n=0.02$ (рис. 6, столбец (c)). Для 4 апреля 2011 года 12:15 UT и 13:45 UT для ионозонда Sondrestrom $m_d=0.29$ и $m_n=0.02$ (рис. 7, ряд 1 и 3, столбец (c)). Для 4 апреля 2011 года 12:15 UT и 13:45 UT для ионозонда Qaanaaq $m_d=0.29$ и $m_n=0.02$ (рис. 7, ряд 2 и 4, столбец (c)). Стоит отметить, что полное поглощение состоит из суммы поглощений, вызванных рентгеновскими вспышками, ультрафиолетовым излучением и высыпанием энергичных солнечных протонов. Поэтому для улучшения совпадения минимальных частот скачков экспериментальных ионограмм с минимальными частотами ионограмм с улучшенной частотной зависимостью и оптимизированными коэффициентами m_d и m_n для ионозонда Qaanaaq 4апреля 2011 года был изменен коэффициент в формуле Davies

(формула 2) на $I_0=120$ в программном коде среды MatLab. Также стоит отметить, что изменения коэффициента m_n результата никакого не давали, так как ионозонды Sondrestrom и Qaanaaq в наши выбранные даты находились в дневное время. В ночное время уже необходимо изменять коэффициент m_n .

Литература

1. Rawer, K., 1976. Manual of Ionospheric Absorption Measurements. World Data Center-A, Boulder, CO, USA, pp. 164–199 (Ed.).
2. Zaalov, N.Y., Warrington, E.M., Stocker, A.J., 2005. A ray-tracing model to account for off-great circle HF propagation over northerly paths. Radio Sci. 40, RS4006.
3. Jones, R.M., Stephenson, J.J., 1975. A Versatile Three-dimensional Raytracing Computer Program for Radio Waves in the Ionosphere. Office for Telecommunications, OT 75-76, U.S. Department of Commerce, Washington, USA.
4. Moskaleva, E.V., Zaalov, N.Y., 2013. Signature of polar cap inhomogeneities in vertical sounding data. Radio Sci. 48 (5), 547–563. <http://dx.doi.org/10.1002/rds.20060>.
5. Ginzburg, V.L., 1970. The Propagation of electromagnetic Waves in Plasmas. New York Pergamon Press, Oxford.
6. Sauer, H.H., Wilkinson, D.C., 2008. Global mapping of ionospheric HF/VHF radio wave absorption due to solar energetic protons. Space Weather 6, S12002. <http://dx.doi.org/10.1029/2008SW000399>.

7. Moskaleva, E.V., Zaalov, N.Y., 2014. Multi-beam sounding ionograms in the polar cap region: absorption induced by proton precipitations. *Adv. Space Res.* 54 (9), 1743–1750.
8. Davies, K., 1965. *Ionospheric Radio Propagation*. United States Department of Commerce, National Bureau of Standards Monograph 80.
9. Chukwuma, V., 2000. An A3 investigation of frequency dependence of absorption in the equatorial region. *Indian J. Radio Space Phys.* 29 (1), 15–21.
10. Schumer, E.A., *Improved Modeling of Midlatitude D-region Ionospheric Absorption of High Frequency Radio Signals During Solar X-ray Flares*, Dissertation, AFIT/DS/ENP/09-J01, 2009.